
Materia Oscura en el Universo
Instituto de Física
Universidad Nacional Autónoma de México

Instructor: Patrick J. Fitzpatrick
Correo: fitzppat@fisica.unam.mx

Resumen del curso

Una introducción intensiva a la física y cosmología de la materia oscura, diseñada para proporcionar a los participantes las herramientas analíticas y numéricas necesarias para calcular su producción en el universo temprano, para una amplia gama de candidatos de materia oscura, tanto en escenarios de producción térmica como no térmica, y evaluar su viabilidad frente a las búsquedas experimentales actuales y futuras.

Se discutirán los principales paradigmas en la búsqueda de materia oscura: candidatos de materia oscura provenientes de extensiones del Modelo Estándar producidos mediante interacciones no gravitacionales con partículas del Modelo Estándar, agujeros negros primordiales como materia oscura y producción gravitacional directa de materia oscura. Se dará énfasis a la producción de materia oscura a través de interacciones no gravitacionales con partículas del Modelo Estándar, en escenarios térmicos, no térmicos y de desacoplamiento térmico.

Los participantes se familiarizarán con los principales candidatos de materia oscura, incluyendo las partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPs, por sus siglas en inglés), como los winos, higgsinos y neutralinos, así como con diversas extensiones del Modelo Estándar más allá del paradigma WIMP. Adquirirán las herramientas necesarias para calcular la producción térmica, no térmica y por desacoplamiento térmico de materia oscura mediante interacciones no gravitacionales, en el marco de cualquier modelo dado de materia oscura.

El curso abordará un amplio rango de señales y búsquedas experimentales de materia oscura, desde observaciones cosmológicas del universo temprano y tardío (por ejemplo, nucleosíntesis primordial, anisotropías de temperatura del fondo cósmico de microondas, formación de estructuras a gran y pequeña escala, oscilaciones acústicas de bariones, lentes gravitacionales, cosmología de 21 cm y el bosque de Lyman- α) hasta búsquedas en detección directa e indirecta, experimentos de blancos fijos y colisionadores.

Este curso constituye una introducción esencial para estudiantes interesados en realizar investigación científica en la búsqueda de la materia oscura.

Resultados del curso

Al finalizar el curso, los estudiantes que participen con éxito:

- | Desarrollarán la capacidad de analizar modelos de materia oscura dentro del amplio panorama de candidatos producidos mediante interacciones no gravita-

cionales, tanto en escenarios de producción térmica como no térmica, dentro y más allá del paradigma WIMP.

- | Dominarán las herramientas necesarias para resolver las ecuaciones de Boltzmann que describen la producción de la densidad relíquia de materia oscura en escenarios térmicos y no térmicos.
- | Aprenderán el uso de herramientas numéricas estándar para la exploración de nuevos modelos de física de partículas, el cálculo de la producción de materia oscura y sus señales experimentales, incluyendo SARAH, SPheno y Micr0megas.
- | Aprenderán a calcular y analizar el conjunto de señales experimentales, astrofísicas y cosmológicas de los principales candidatos de materia oscura, con el fin de evaluar su viabilidad experimental.
- | Comprenderán los fundamentos de los principales candidatos de materia oscura producidos gravitacionalmente – agujeros negros primordiales y materia oscura generada por producción gravitacional directa – y analizarán sus restricciones observacionales y experimentales.

Libros y materiales

- | **Recursos en Línea:** Todos los materiales esenciales del curso estarán disponibles en el repositorio de GitHub correspondiente

(Por crear)

En él se encontrarán los cuadernos de Mathematica con las lecciones y ejercicios desarrollados en clase, así como ejemplos resueltos.

Mathematica puede descargarse en:

<https://www.software.unam.mx/software/mathematica-y-wolfram-alpha-pro>

SARAH puede descargarse en:

<https://sarah.hepforge.org>

SPheno puede descargarse en:

<https://spheno.hepforge.org>

Micr0megas puede descargarse en:

<https://lapth.cnrs.fr/micromegas/>

- | **Recursos esenciales:** Se proporcionarán archivos PDF de los siguientes materiales, los cuales estarán disponibles en el repositorio de GitHub del curso:

- Stefano Profumo, *An Introduction to Particle Dark Matter*, World Scientific (2017)
- E.W. Kolb and M.S. Turner, *The Early Universe*, vol. 69, Taylor and Francis (2019)
- P. Gondolo and G. Gelmini, *Cosmic abundances of stable particles: Improved analysis*, Nucl. Phys. B 360 (1991) 145–179

- | **Recursos recomendados:** También se recomienda a los estudiantes consultar los siguientes materiales adicionales (cuyos archivos PDF estarán disponibles en el repositorio de GitHub del curso):

- T.R. Slatyer, *Indirect Detection of Dark Matter*, in Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: Anticipating the Next Discoveries in Particle Physics, pp. 297–353, 2018, arXiv: 1710.05137

- M. Lisanti, *Lectures on Dark Matter Physics*, in Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: New Frontiers in Fields and Strings, pp. 399–446, 2017, 1603.03797

Software y herramientas requeridas

- | **Sistema operativo:** Windows, Linux o macOS. Se recomienda Linux o macOS.
- | **Software:** Mathematica, SARAH, SPheno, MicrOmegas

Requisitos

Física de Partículas Elementales, Teoría Cuántica de Campos I

Temario

1. Introducción a los Modelos Estándar de la física de partículas y de cosmología
 - **Revisión breve** del Modelo Estándar de la física de partículas y sus problemas pendientes
 - Interacciones fuerte, electrodébil y electromagnética
 - El problema CP fuerte y los axiones
 - El problema de la jerarquía y las extensiones supersimétricas del Modelo Estándar
 - Oscilaciones de neutrinos
 - El problema de la materia oscura
 - **Revisión breve** del Modelo Estándar de cosmología, sus problemas pendientes y la inflación cósmica
 - La métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker
 - Dinámica cósmica del Universo multicomponente
 - Ecuaciones de Friedmann, de fluido y de aceleración; ecuaciones de estado
 - Candelas estándar, aceleración cósmica y el parámetro de Hubble H_0
 - El problema de la planitud, del horizonte, del monopolo, y la solución inflacionaria.
 - Evolución de las fluctuaciones de densidad primordiales durante la inflación cósmica — teoría de perturbaciones cosmológicas lineales, anisotropías de temperatura del CMB
2. Breve historia térmica del Universo
 - Desde el recalentamiento ($T \sim 10^{16}$ GeV) hasta la recombinação ($T \sim 0.3$ eV) y la actualidad: inflación, recalentamiento, bariogénesis, leptogénesis, unificación electrodébil, confinamiento QCD, desacoplamiento de neutrinos, congelamiento de la razón neutrón/protón, nucleosíntesis primordial, igualdad materia-radiación, recombinação, dominación de la energía oscura
 - Termodinámica de equilibrio en el Universo en expansión
 - Equilibrio estadístico térmico y químico
 - Congelamiento (“freeze-out”) y el origen de las especies
 - Producción de materia oscura en la historia térmica del Universo
3. El paradigma térmico de materia oscura WIMP
 - Producción térmica de la abundancia relíquia WIMP en la aproximación de congelamiento instantáneo
 - El “milagro WIMP”

- Principales candidatos WIMP: wino, higgsino, neutralino, portales vectoriales, portales de Higgs y portales de neutrinos
- ¿WIMPs: vivos o muertos? Restricciones experimentales: detección indirecta y directa, CMB, BBN, colisionadores y experimentos de blancos fijos, restricciones cosmológicas

4. Cálculo de la historia térmica del sector oscuro: la ecuación de Boltzmann

- La ecuación de Boltzmann y sus momentos
- Promedios térmicos de tasas de decaimiento y secciones eficaces; expansión en ondas parciales
- Secciones eficaces promediadas térmicamente en la aproximación del umbral
- Producción térmica del WIMP (revisitada): resolución analítica de la ecuación de Boltzmann en la aproximación del umbral

5. Cálculo numérico de la producción térmica de materia oscura WIMP y sus señales experimentales

- Resolución numérica de la ecuación de Boltzmann para la producción térmica de materia oscura WIMP en un código original
- Cálculo de la producción térmica de materia oscura WIMP y sus señales experimentales utilizando herramientas numéricas existentes: SARAH, SPheno, Micr0megas

6. Producción térmica de materia oscura más allá del paradigma WIMP

- Evadiendo fuertes restricciones experimentales en la escala electrodébil: materia oscura térmica ligera (sub-GeV) y materia oscura superpesada más allá del límite de unitariedad
- Relíquias térmicas simétricas: semi-aniquilaciones, co-aniquilaciones, co-dispersiones, aniquilaciones prohibidas, partículas masivas fuertemente interactuantes (SIMPs), autoaniquilaciones $n \rightarrow 2$
- Materia oscura asimétrica

7. Producción no térmica de materia oscura muy débilmente (“feeblely”) interactuante (FIMPs)

- Producción de materia oscura por “freeze-in”
- Producción de materia oscura “super-WIMP”

8. Caníbales, ELDERs y KINDERs: materia oscura que se desacopla térmicamente durante congelamiento

- Desacoplamiento elástico y cinético; dinámica de congelamiento en sectores oscuros térmicamente aislados

9. Materia oscura tipo axión, axiones ultraligeras y partículas escalares ligeras

10. Mecanismos gravitacionales de producción de materia oscura

- Agujeros negros primordiales como materia oscura
- Producción gravitacional directa de materia oscura

11. Señales y búsquedas experimentales

- Señales cosmológicas: fondo cósmico de microondas, nucleosíntesis primordial, estructura a gran escala
- Señales astrofísicas: estructura a pequeña escala, morfología galáctica, lentes gravitacionales, enfriamiento de supernovas
- Detección directa e indirecta, búsquedas en colisionadores y experimentos de blancos fijos, búsquedas de axiones y de materia oscura ultraligera

Detalles y objetivos del temario

Sección 1: Introducción a los Modelos Estándar de la física de partículas y de cosmología

Se revisará la estructura del Modelo Estándar de la física de partículas y sus problemas pendientes – en particular, el problema de la materia oscura – junto con una breve reseña histórica de su descubrimiento. También se presentarán las herramientas básicas de la teoría cuántica de campos necesarias para describir las interacciones entre la materia oscura y las partículas del sector visible. Asimismo, se revisarán los fundamentos del Modelo Estándar de cosmología y las herramientas esenciales para describir la dinámica de un espacio-tiempo en expansión tipo FLRW, incluyendo una fase de inflación cósmica y la evolución de las inhomogeneidades primordiales imprimidas en las anisotropías de temperatura del CMB.

Sección 2: Breve historia térmica del Universo

Se presentará la termodinámica de equilibrio en un espacio-tiempo FLRW en expansión, la evolución de las densidades de número, energía y entropía de las partículas acopladas al plasma del Modelo Estándar bajo equilibrio térmico y químico, y el origen de las especies a través del proceso de congelamiento (freeze-out).

Estas herramientas se desarrollarán en el contexto de una revisión cronológica concisa de la historia térmica del Universo, en la cual los estudiantes aproximarán las temperaturas características de los principales eventos térmicos, desde el recalentamiento, pasando por la nucleosíntesis primordial y la recombinación, hasta la época actual. Finalmente, se identificará el rango de temperaturas correspondiente a la producción térmica de materia oscura en relación con los demás eventos de la historia térmica del Universo.

Sección 3: El paradigma térmico de la materia oscura WIMP (partículas masivas débilmente interactuantes)

Se presentará el cálculo del denominado “milagro WIMP”: la aparición natural de la producción térmica de materia oscura WIMP, obtenida en la aproximación de congelamiento instantáneo mediante estimaciones paramétricas de la sección eficaz de aniquilación. Asimismo, se describirán los principales candidatos WIMP de materia oscura: aquellos con acoplamientos directos al Modelo Estándar – como el wino, higgsino y neutralino –, así como aquellos pertenecientes a sectores oscuros extendidos acoplados al Modelo Estándar mediante portales vectoriales, de Higgs o de neutrinos. Finalmente, se analizará el conjunto de restricciones experimentales (fuertemente restrictivas) sobre la nueva física en la escala electrodébil, con el propósito de evaluar la viabilidad experimental del paradigma WIMP y motivar la exploración de escenarios de materia oscura más allá de dicho paradigma.

Sección 4: Cálculo de la historia térmica del sector oscuro

Se presentan las herramientas necesarias para calcular la producción térmica y no térmica de materia oscura mediante la resolución de la ecuación de Boltzmann para la evolución de su densidad en el espacio de fases. Esto incluye aproximaciones para la producción de materia oscura no relativista, que permiten obtener soluciones analíticas de la ecuación de Boltzmann. El denominado milagro WIMP se revisita en este contexto, resolviendo analíticamente la ecuación de Boltzmann en la aproximación del umbral.

Sección 5: Cálculo numérico de la producción térmica de materia oscura y sus señales experimentales

Las herramientas presentadas en Sección 4 para resolver la ecuación de Boltzmann se implementan para calcular numéricamente la producción térmica de materia oscura. En primer lugar, los estudiantes serán guiados en el desarrollo de un código numérico original para calcular la producción térmica de materia oscura tipo WIMP (utilizando, por ejemplo, *Mathematica* o *Python*) y comparar sus resultados con las estimaciones analíticas obtenidas previamente.

Posteriormente, se introducen las herramientas computacionales estándar empleadas en la exploración de nuevos modelos de física más allá del Modelo Estándar y en el cálculo de la producción de materia oscura y sus señales experimentales: SARAH, SPheno y Micr0megas. Con ellas, los estudiantes volverán a calcular la producción térmica de materia oscura tipo WIMP, así como algunas de sus principales restricciones experimentales, por ejemplo, la dispersión directa materia oscura–núcleo.

Finalmente, al visualizar las restricciones experimentales sobre la materia oscura WIMP, los estudiantes estarán en posición de comprender sus limitaciones y motivarse a explorar alternativas más allá del paradigma térmico WIMP.

Sección 6: Producción térmica de materia oscura más allá del paradigma WIMP

Se presentan los candidatos de materia oscura producidos térmicamente que van más allá del paradigma WIMP. En primer lugar, se discuten las escalas de energía relevantes para la producción de materia oscura próximas a la escala electrodébil: las escalas ligeras (sub-GeV), donde existe una proliferación de nuevas búsquedas experimentales, y la materia oscura térmica superpesada, más allá del límite de unitariedad.

Se introduce un conjunto diverso de reliquias térmicas simétricas y se calcula su densidad reliquia resolviendo la ecuación de Boltzmann en la aproximación del umbral para varios ejemplos representativos (por ejemplo, materia oscura prohibida y materia oscura tipo SIMP). También se presenta el cálculo de la abundancia de reliquias térmicas asimétricas.

De este modo, los estudiantes adquieren una visión amplia del panorama de la materia oscura térmica más allá del paradigma WIMP, que abarca tanto las escalas ligeras (sub-GeV) como las superpesadas ($> 10^6$ GeV).

Sección 7: Producción no térmica de materia oscura muy débilmente (“feeble”) interactuante (FIMPs, por sus siglas en inglés)

Se presenta la producción no térmica de materia oscura con interacciones no gravitacionales extremadamente débiles (“feeble”) con las partículas del Modelo Estándar. Se enfoca en el mecanismo de producción por freeze-in de materia oscura tipo FIMP, cuyo cálculo y visualización numérica los estudiantes aprenderán a realizar.

Section 8: Caníbales, ELDERs y KINDERs: materia oscura que se desacopla térmicamente durante congelamiento

Se presenta la producción de materia oscura a través de congelamiento (freeze-out) incluyendo los efectos del desacoplamiento cinético. En el contexto de la materia oscura tipo ELDER (Elastically Decoupling Relic), se describe el fenómeno de la canibalización y el calentamiento de un sector oscuro térmicamente aislado. En el marco más general de la materia oscura tipo KINDER (Kinetically Decoupling Relic), se analiza la dinámica general de los sectores oscuros térmicamente desacoplados.

Asimismo, se discuten diversas restricciones experimentales relevantes sobre los modelos ELDER y KINDER, incluyendo sus efectos en la formación de estructuras a pequeña escala, sus auto-interacciones y sus restricciones del BBN y CMB.

Sección 9: Materia oscura tipo axión QCD, axiones y escalares ultraligeros

Esta sección inicia con una breve revisión del problema CP fuerte, el mecanismo de Peccei-Quinn y el axión como el bosón pseudo-Nambu-Goldstone asociado al rompimiento espontáneo de la simetría $U(1)_{PQ}$. Se presentan los mecanismos cosmológicos de producción del axión QCD: el mecanismo de desalineamiento, la desintegración de defectos topológicos y los posibles canales de producción térmica.

La discusión se extiende luego a partículas tipo axión (axion-like particles, ALPs) y a campos escalares ultraligeros como candidatos de materia oscura condensada no térmica (por ejemplo, “fuzzy dark matter”). Finalmente, se analizan sus principales señales experimentales, astrofísicas y cosmológicas, incluyendo búsquedas en cavidades resonantes, experimentos de resonancia magnética nuclear, la supresión de la estructura a pequeña escala y las señales en el fondo cósmico de microondas, entre otras.

Sección 10: Mecanismos gravitacionales de producción de materia oscura

Se presenta **una breve introducción a los agujeros negros primordiales formados por el colapso directo de perturbaciones de densidad en el universo muy temprano** – en lugar de por colapso estelar – como posibles candidatos de materia oscura. Se analizarán varios de los escenarios más comúnmente propuestos para su formación, con énfasis en su origen a partir de inhomogeneidades y perturbaciones de densidad generadas durante la inflación. Se mostrará el cálculo de la fracción de masa y de densidad de los agujeros negros primordiales, junto con una revisión de sus principales restricciones experimentales y observacionales, tales como la evapación, el lente gravitacional y las ondas gravitacionales.

Si el tiempo lo permite, se ofrecerá **una breve introducción, principalmente cualitativa, a la producción gravitacional directa de materia oscura durante el recalentamiento**, junto con sus posibles señales observacionales y el rango de masas de materia oscura (para una temperatura de recalentamiento dada) que produce la abundancia relíquia observada en este marco.

Sección 11: Señales y búsquedas experimentales

En el contexto de la producción térmica y no térmica de materia oscura dentro de un modelo dado, se presentará un análisis detallado del conjunto de señales experimentales relevantes. A través de este estudio final y extensivo, los estudiantes adquirirán experiencia en el cálculo de la viabilidad experimental de un candidato de materia oscura frente a señales de detección indirecta y directa, experimentos de blancos fijos, observaciones del fondo cósmico de microondas y otras restricciones astrofísicas, cosmológicas y experimentales.

Esta sección podrá incluirse además como parte de un proyecto final guiado, desarrollado por los estudiantes de manera individual o en equipo.